



Konstruktion, Analyse und
Inbetriebnahme eines Gelenks
zur rotatorischen Entkopplung
für ein UAV-Helikopter-
Landesystem

Viet Duc Pham



BACHELORARBEIT

KONSTRUKTION, ANALYSE UND INBETRIEBNAHME EINES GELENKS ZUR ROTATORISCHEN ENTKOPPLUNG FÜR EIN UAV-HELIKOPTER-LANDESYSTEM

Freigabe:

Der Bearbeiter:

Unterschriften

Pham Viet Duc



Betreuer:

Maier Moritz



Der Institutsdirektor

Dr. Alin Albu-Schäffer



Dieser Bericht enthält 58 Seiten, 24 Abbildungen und 9 Tabellen

Hochschule München



Fakultät für angewandte
Wissenschaften und
Mechatronik

Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e. V.



Institut für Robotik und
Mechatronik

Bachelorarbeit

Konstruktion, Analyse und Inbetriebnahme eines Gelenks zur rotatorischen Entkopplung für ein UAV-Helikopter-Landesystem

Autor: Viet Duc Pham

Matrikelnummer: 02099811

Februar 2015

Betreuer: Prof. Dr. Simon Wiedemann
Dipl.-Ing. Moritz Maier

Name: Viet Duc Pham
geb.: 01.08.1992
Matr.Nr.: 02099811
Fk06 MFB7G im WS 14/15

Eidesstattliche Erklärung

gemäß §13 Abs. 5 RaPO

Hiermit erkläre ich, Viet Duc Pham, gegenüber der Fakultät der Hochschule München, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ausschließlich unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis genannten Quellen angefertigt habe.

Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form an keiner anderen Hochschule oder Universität vorgelegt.

München, 15. Februar 2015

Viet Duc Pham

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden für ein Helikopter-Landesystem mehrere Gelenke entworfen, welche bei geschlossenem Kontakt ein unbemanntes Flugfahrzeug (UAV) und einen Manipulator rotatorisch entkoppeln und nur die translatorischen Freiheitsgrade des UAVs einschränken. Einzelne Komponenten der Konstruktion werden mithilfe von 3D-Druck-Verfahren gefertigt. Anschließend werden die Entwürfe kinematisch untersucht und verglichen. Das im Hinblick auf Arbeitsraum, Leichtgängigkeit, Gewicht und Spielfreiheit erfolgversprechendste Konzept wird am UAV montiert und getestet. Um einen kraftschlüssigen Kontakt zwischen UAV und Roboter zu gewährleisten, kommt ein Elektromagnet zum Einsatz, welcher am Endeffektor des Manipulators montiert und in die bestehende Steuerungssoftware integriert ist.

Abstract

As part of this thesis several joints are designed for a helicopter landing system. The optimal joint has the task to connect an UAV with a light-weight robot, while only restraining the translational degrees-of-freedom and leaving the rotational movements as they are. Individual components of the structure are manufactured using 3D printing technology. Subsequently, the kinematics of the individual designs are investigated and compared. The most promising product regarding size, weight, ease of movement and backlash is assembled and tested with the UAV. An electromagnet, which is mounted at the end-effector of the manipulator, is used to ensure a tight and secure fit between UAV and robot. The magnet is also implemented into the existing control software.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VIII
1. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	1
1.1. Allgemein	1
1.2. Das <i>Flying Robots Team</i>	1
2. Entwurf und Konstruktion der Varianten	3
2.1. Hintergrund und technische Anforderungen	3
2.2. Rapid Prototyping	5
2.3. Variante 1: Kardangelenk mit Kugellager	6
2.3.1. Kardangelenk	6
2.3.2. Gehäuse	7
2.3.3. Welle	9
2.3.4. Stahlplatte und Verbindungswelle	10
2.3.5. Zusammenbau des Gelenks	10
2.4. Variante 2: Sphärisches Kugelgelenk	13
2.4.1. igubal-Clips-Gelenklager	13
2.4.2. Gehäuse	14
2.4.3. CFK-Rohre	14
2.4.4. Zusammenbau des Gelenks	15
2.5. Vergleich der Gelenkvarianten	16
3. Kinematische Analyse	17
3.1. Kinematik	17
3.1.1. Rotationsmatrizen	17
3.1.2. Euler-Winkel	19
3.1.3. Denavit-Hartenberg-Parameter	20
3.2. Analyse	22
3.2.1. Planarer Fall	22
3.2.2. Dreidimensionaler Fall	24
3.3. 3D-Plot des Arbeitsraums mit Bewertung	25

4. Implementierung	27
4.1. Adapter	27
4.2. Elektromagnet	28
4.3. Systemtest	30
5. Zusammenfassung und Ausblick	33
A. Anhang	35
Literaturverzeichnis	38

Abbildungsverzeichnis

2.1. Landung von UAV-Helikoptern mit Seil [8]	3
2.2. Simulation von Helikopter-Landesystemen	4
2.3. Im Gussverfahren gefertigtes Landeklappenscharnier aus Stahl (links) und topologie-optimiertes und lasergesintertes Scharnier (rechts) [15]	5
2.4. Fused Filament Fabrication [10]	6
2.5. Kardangeln von Robbe [11]	6
2.6. Schnapphaken im ersten Entwurf	7
2.7. Bruch der Schnapphaken	8
2.8. Fehler beim 3D-Druck	8
2.9. Technische Zeichnung der Welle	9
2.10. Verbindungsstück zwischen Kardangeln und Stahlplatte	10
2.11. Montiertes Gelenk im Schnitt	11
2.12. Produkt der Gelenkvariante 1	11
2.13. Heavy Duty - ECLM-08-04-HD[6]	13
2.14. Modell des Gehäuses für das Clips-Gelenklager	14
2.15. Produkt der Gelenkvariante 2	15
3.1. Veranschaulichung der D-H-Parameter [1]	20
3.2. Schematische 2D Skizze	22
3.3. Festlegung der Koordinatensysteme	23
3.4. 3D-Plot des Arbeitsraums	25
4.1. CAD Modell des Adapters	27
4.2. Elektromagnet mit Adapter	28
4.3. Schaltplan für Spannungswandler	29
4.4. AR.Drone auf dem LBR	30
4.5. LBR Hardware Layout	31

Tabellenverzeichnis

2.1. Rahmenbedingungen	4
2.2. Stückliste der Variante 1	12
2.3. Varianten des Herstellers	13
2.4. Stückliste Variante 2	15
2.5. Variante 1 Kardangelenk	16
2.6. Variante 2 Kugelgelenk	16
3.1. Geometrische Abmaße der Gelenke	22
3.2. D-H-Parameter 2D	23
4.1. Kennwerte des Elektromagneten	28

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
D-H	Denavit-Hartenberg
FFF	Fused Filament Fabrication
GPIO	General Purpose Input/Output
LBR	Leichtbauroboter
PIH	Pin-In-Hole
PLA	Polyactide
RAST	Recovery Assist, Secure and Traverse System
RMC	Robotik und Mechatronik Zentrum
SMD	Surface-Mounted Device
SO(n)	Spezielle Orthogonale Gruppe im n-dimensionalen Raum
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben			
Symbol	Einheit	Beschreibung	Dim.
\mathbf{A}_I	-	Transformationsmatrix für die D-H Transformation	$\mathbb{R}^{4 \times 4}$
\mathbf{I}	-	Einheitsmatrix	$\mathbb{R}^{3 \times 3}$
\mathbf{R}	-	Rotationsmatrix	$SO(3)$
\mathbf{R}_{IK}	-	Transformationsmatrix für den Eulerwinkel	$\mathbb{R}^{3 \times 3}$
\mathbf{R}_x	-	Rotationsmatrix um die x-Achse	$SO(3)$
\mathbf{R}_y	-	Rotationsmatrix um die y-Achse	$SO(3)$
\mathbf{R}_z	-	Rotationsmatrix um die z-Achse	$SO(3)$
\mathbf{a}	m/s ²	Beschleunigung	\mathbb{R}
a_i	mm	Länge der Verbindung	\mathbb{R}
d_i	mm	Abstand zwischen der aktuellen Achse x_i und der Achse x_{i+1}	\mathbb{R}
i	m/s	Winkelgeschwindigkeit	\mathbb{R}
Δi	m/s	Kardanfehler	\mathbb{R}
l_1	mm	Abstand des Gelenks zur Stahlplatte	\mathbb{R}
l_2	mm	Abstand des Gelenks zum UAV	\mathbb{R}
\mathbf{o}	m ²	Ort	\mathbb{R}
\mathbf{v}	m/s	Geschwindigkeit	\mathbb{R}
x, y, z	mm	Koordinaten der Positionen	\mathbb{R}

Griechische Buchstaben			
Symbol	Einheit	Beschreibung	Dim.
α_i	rad	Winkel zwischen der aktuellen Achse z_i und der Achse z_{i+1}	\mathbb{R}
φ	rad	Rollwinkel	\mathbb{R}
ψ	rad	Gierwinkel	\mathbb{R}
θ	rad	Nickwinkel	\mathbb{R}
ϑ_i	rad	Gelenkwinkel Abstand zwischen der aktuellen Achse x_i und der Achse x_{i+1}	\mathbb{R}

1. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

1.1. Allgemein

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist eine staatliche Forschungseinrichtung für Luft- und Raumfahrt sowie Energietechnik, Verkehr und Sicherheit. Bereits 1907 wurde der erste Vorläufer des DLR in Göttingen gegründet. Aus der damaligen Versuchsanstalt für Aerodynamik entwickelte sich über die Jahrzehnte die international anerkannte Forschungseinrichtung, welche 1989 ihren heutigen Namen erhielt [3]. National ist das DLR mittlerweile mit Hauptsitz in Köln an 16 verschiedenen Standorten in Deutschland vertreten. Im Auftrag der Bundesregierung ist das DLR für die Planung und Umsetzung deutscher Raumfahrtaktivitäten zuständig. Der Standort Oberpfaffenhofen, wo diese Bachelorarbeit entstanden ist, besteht aus 12 Instituten, wobei das Robotik und Mechatronik Zentrum (RMC) den größten Anteil des Standorts einnimmt [4]. Das RMC ist wiederum in drei Institute gegliedert: in das Institut für Optische Sensorsysteme, das Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik sowie das Institut für Robotik und Mechatronik. Hier werden für die Raumfahrt Robotiksysteme entwickelt, die Astronauten unterstützen oder sogar die Steuerung eines Roboters vom Boden aus ermöglichen. Aus Erkenntnissen, die aus den Forschungsgebieten des DLR hervorgegangen sind, konnten Menschen unterstützende Systeme entwickelt werden. Justin, ein humanoider Roboter mit zwei Armen, der Menschen im Alltag helfen soll, wurde zu einem Aushängeschild der DLR-Robotik.

1.2. Das *Flying Robots Team*

Die Flying Robots-Gruppe ist Teil des RMCs und beschäftigt sich mit der Entwicklung von robotischen Technologien für unbemannte fliegende Systeme (UAVs). Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Schaffung von Synergien zwischen robotischen Technologien und autonom fliegenden Plattformen. Es wird an Anwendungen geforscht, die eine physikalische Interaktion der UAVs mit der Umwelt verlangen. Das Spektrum der Forschung erstreckt sich hierbei von der Verarbeitung von Sensordaten bis hin zu Planung und Ausführung von Experimenten, wo UAVs unter realen Bedingungen beispielsweise Wasser- oder Erdproben gewinnen. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die Landung eines Helikopters mithilfe eines robotischen Manipulators. Ein solcher Manipulator soll Landungen auf bewegten Plattformen, unter normalen oder widrigen Witterungsbedingungen, vereinfachen oder sogar erst ermöglichen [5].

2. Entwurf und Konstruktion der Varianten

2.1. Hintergrund und technische Anforderungen

In dieser Arbeit steht das Landen von UAV-Helikoptern auf bewegten Plattformen im Mittelpunkt. Es existieren bereits Untersuchungen zum Verhalten beim Landen von UAV-Helikoptern auf beweglichen Plattformen, bei denen Seile zum Landen des UAV benutzt werden (Abb. 2.1). Diese Methode funktioniert wie das Recovery Assist, Secure and Traverse System (RAST). Hierbei handelt es sich um ein System, welches bei bemannten Helikoptern verwendet wird. Unter Benutzung einer Seilwinde kann hiermit auf beweglichen Plattformen gelandet werden. Ein großer Nachteil von RAST ist, dass Menschen an

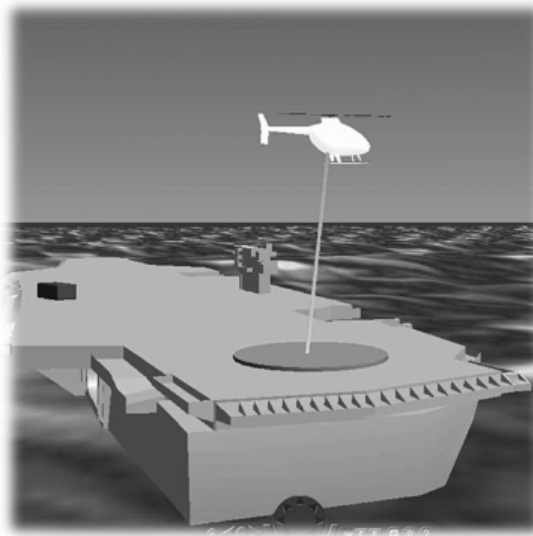
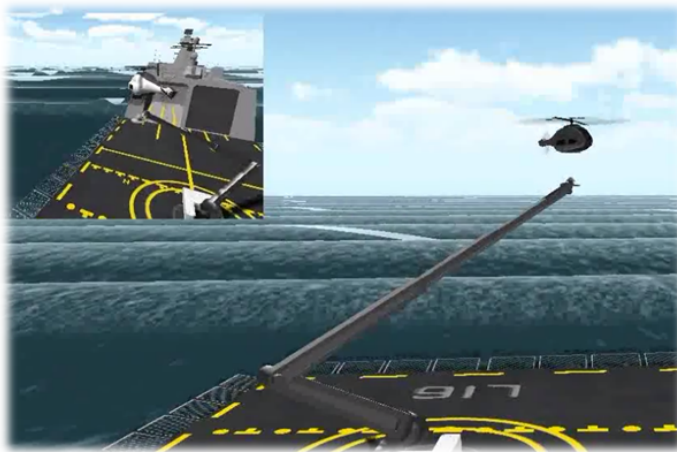


Abbildung 2.1.: Landung von UAV-Helikoptern mit Seil [8]

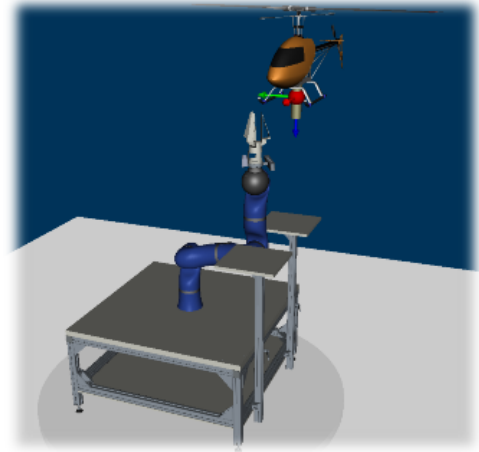
Deck benötigt werden um ein Seil, welches vom Helikopter herunter gelassen wird, an der Seilwinde zu befestigen. Bei schlechten Wetterbedingungen wie Sturm, ist das Risiko eine Person auf das Deck zu schicken zuweilen nicht vertretbar.

Das UAV-Helikopter-Landesystem, für welches in dieser Arbeit das zu fertigende Gelenk gedacht ist, verwendet anstelle des Seils einen Roboterarm. Am Endeffektor des Arms soll ein Elektromagnet befestigt werden, um einen kraftschlüssigen Kontakt zwischen UAV

und Roboter zu gewährleisten. Beim Endeffektor handelt es sich in der Robotik um das letzte Element in einer kinematischen Kette. Hierbei kann es sich um einen Greifer, Elektromagneten oder ähnlichem handeln. Der Roboterarm soll die Bewegung der Plattform ausgleichen, Kontakt zwischen Leichtbauroboter (LBR) und UAV herstellen und das UAV gezielt landen. Diese Idee stammt von der Firma Prism Defence und zeigt, dass Interesse von Seiten der Industrie gegeben ist. Auf Abbildung 2.2(a) ist eine Simulation von



(a) Unbemannter Helikopter von Prism Defence [16]



(b) Konzeptstudie aus dem DLR

Abbildung 2.2.: Simulation von Helikopter-Landesystemen

Prism Defence zu sehen, auf der ein Roboterarm einem unbemannten Helikopter helfen soll auf einem Schiff zu landen. Rechts daneben befindet sich eine Simulation des Aufbaus, wie er im DLR realisiert werden soll. Bei den ersten Testläufen wird der Quadrocopter Parrot AR.Drone 2.0 verwendet. Sein Gewicht beläuft sich auf 420 g. Die maximale Nutzlast des Quadrocopters für das zu konstruierende Gelenk beschränkt sich auf ca. 110 g, da das UAV bei höherem Gewicht an Flugstabilität einbüßt. Der Auslenkungswinkel aus dem Ruhezustand soll mindestens 20° - 30° betragen, wobei nur die translatorischen Freiheitsgrade des UAV eingeschränkt werden dürfen. Eine kurze Übersicht über die wichtigsten Fakten ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Entsprechend der Vorgaben, beinhaltet der Entwurf der ersten Gelenkvariante ein Kardangelen, zwei Kugellagern und eine 4 mm dicken Stahlwelle. Für das Gelenk soll ein passendes Gehäuse und eine Möglichkeit zur Montage am Quadrocopter konzipiert werden. Unter Verwendung eines 3D-Druckers und verschiedenen Filamenten sollen Prototypen erstellt werden. Ein Filament ist das Verbrauchsmaterial beim 3D-Druck, welches aus verschiedenen Materialien bestehen kann. Die Produktpannweite reicht von einfachem PLA und ABS bis zu flexiblen Materialien. Alle weiteren Komponenten und Verfahren, die zur Fertigstellung des Produkts benötigt werden, müssen eigenständig recherchiert und implementiert werden.

Tabelle 2.1.: Rahmenbedingungen

Gewicht Gelenk [g]	Kippwinkel [°]	rot. Freiheitsgrade
max. 110	min. 20	3

2.2. Rapid Prototyping

Rapid Prototyping ermöglicht ein schnelles Erstellen eines funktionsfähigen, jedoch vereinfachten Versuchsmodells eines geplanten Produkts. Dieses Verfahren wird in der Industrie aufgrund sinkender Entwicklungszeiten sowie zunehmenden Preisdruck häufig eingesetzt, um weiterhin wettbewerbsfähige Produkte auf den Markt bringen zu können. Durch Tests am Prototypen können frühzeitig Fehler oder Schwächen erkannt und behoben werden. Wenn diese erst innerhalb der Produktion identifiziert werden, entstehen zeitliche und in Anbetracht der Kosten erheblich höhere Aufwände. In der Technik ist der 3D-Druck



Abbildung 2.3.: Im Gussverfahren gefertigtes Landeklappenscharnier aus Stahl (links) und topologie-optimiertes und lasergesintertes Scharnier (rechts) [15]

nicht mehr auf das reine Prototyping beschränkt. Es können voll funktionsfähige Produkte erstellt werden, die in manchen Fällen ohne das generative Verfahren zur schnellen Umsetzung eines computerbasierten 3D-Modells in ein physikalisches Objekt nicht möglich wären. Generative Fertigungsverfahren kommen ohne eine Gussform oder spezielle Werkzeuge aus und werden deswegen oft als werkzeuglose Fertigung bezeichnet. Der Grundgedanke beim Rapid Prototyping ist es, durch schichtweisen Aufbau von Material Objekte herzustellen [2]. In der Luft- und Raumfahrt zeigt sich dies am Beispiel des Whitepaper von EADS IW in Kooperation mit EOS. Das Whitepaper behandelt die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit der Herstellung von Luftfahrtanwendungen an einem konkreten Beispiel, welches auf Abbildung 2.3 zu sehen ist.

Die nachfolgenden Gelenkvarianten sind mithilfe des Ultimaker II erstellt worden. Der Drucker bedient sich der Fused Filament Fabrication (FFF) Technologie. Hierbei wird das Filament eines beliebigen Materials von einer Spule über eine Filamentschraube in den beheizten Extruder eingespeist. Das erhitzte Filament schmilzt und wird durch eine Düse extrudiert. Aufgrund der Erwärmung des Materials verschmilzt es mit dem schon davor extrudierten Filament und formt so eine Bindung entsprechend Abbildung 2.4.

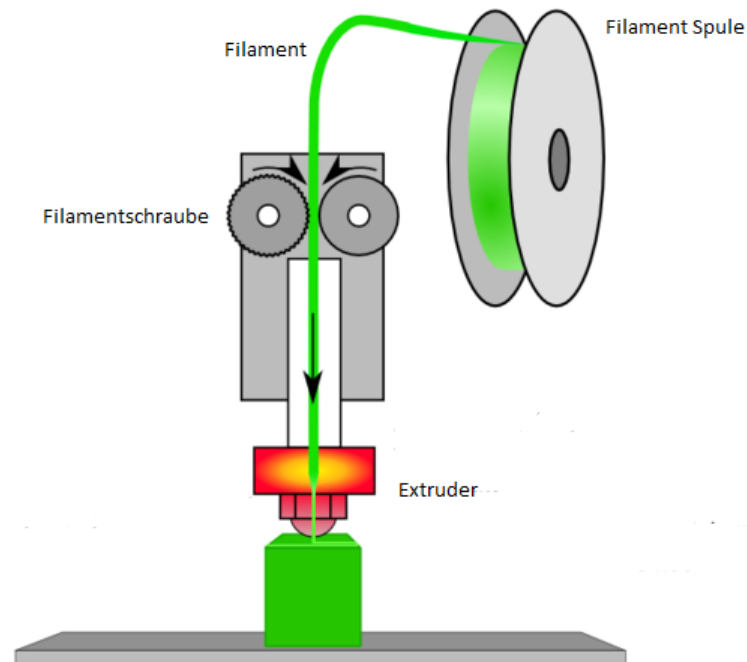


Abbildung 2.4.: Fused Filament Fabrication [10]

2.3. Variante 1: Kardangeln mit Kugellager

2.3.1. Kardangeln



Abbildung 2.5.: Kardangeln von Robbe [11]

Beim vorgegebenen Kardangeln handelt es sich um ein Gelenk mit Kupplungsklauen aus Kunststoff und einem vernickelten Mittelstück aus Messing. Die Befestigung von Wellen am Gelenk erfolgt über zwei Madenschrauben, die sich an den jeweiligen Ende des Kardangelns befinden.

Der Einsatz eines einfachen Kreuzgelenks wie auf Abbildung 2.5 führt ab einem bestimmten Ablenkungswinkel zu Ungleichmäßigkeiten in der Verteilung des Antriebs- und Abtriebsmoments, welche auch Kardanfehler Δi genannt werden. Kinematische Zwänge lassen den Abtriebsdrehwinkel nicht synchron dem Antriebsdrehwinkel folgen, sondern mit wachsendem Beugungswinkel sinusähnlich davon abweichen. Dadurch weicht das Verhältnis der daraus abgeleiteten Winkelgeschwindigkeiten i um den Kardanfehler Δi ab [9]. Die

Ungleichmäßigkeiten führen zu einem unregelmäßigem Verhalten bei der Rotation, was beim Entwurf des Drehgelenks beachtet werden muss. Der maximale Anstellwinkel ist sowohl geometrisch als auch fertigungstechnisch bedingt, bei jeder Gelenkvariante eines Kardangelns unterschiedlich und beträgt beim Gelenk von Robbe ungefähr 35° .

2.3.2. Gehäuse

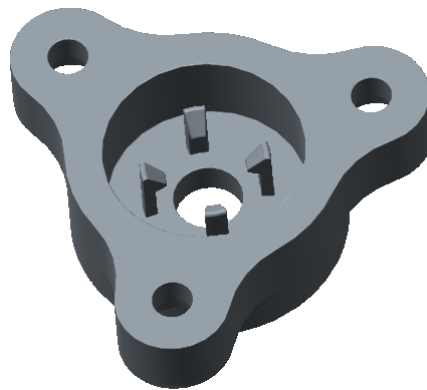


Abbildung 2.6.: Schnapphaken im ersten Entwurf

Besonders wichtig bei der Konstruktion des Gehäuses ist die Gewichtsersparnis, weshalb dieses so kompakt wie möglich gehalten werden muss. Aufgrund der Witterungsbeständigkeit, der besseren Nachbearbeitungsmöglichkeit gegenüber PLA und dem geringeren Reibungswiderstand wird ABS als Filament ausgewählt. Zudem ist ABS flexibler, was die Verwendung von Presspassungen ermöglicht, wohingegen PLA bei einer Presspassung nur äußerst geringe Toleranzen zulässt, die je nach Kalibration des 3D-Druckers nicht eingehalten werden können. Da es sich bei dem vorliegenden Werkstoff um Kunststoff handelt, fällt die erste Wahl zur Befestigung der Kugellager im Gehäuse auf Schnapphaken. Die Materialeigenschaften des Kunststoffs wie Federung, Gleiteigenschaften, Formstabilität und variable Gestaltungsmöglichkeiten können bei dieser Verbindungsmöglichkeit voll ausgenutzt werden. Metallteile wie Schrauben als Verbindung zu verwenden, bedeutet einen höheren Aufwand. Zudem beginnt Kunststoff nach einiger Zeit zu fließen und bietet dadurch keine verlässliche Grundlage für eine Schraubverbindung. Da eine zusätzliche Buchse notwendig wäre, werden Schraubverbindungen ausgeschlossen. Die auf Abbildung 2.6 zu sehenden Schnapphaken wurden auf Grundlage der Veröffentlichung "Beiträge zu einer besseren Schnapphakenauslegung"[7] ausgelegt und nachträglich an den 3D-Druck angepasst, da sich zeigt, dass sich ein über Spritzguss hergestelltes Produkt nicht wie der über FFF hergestellte Prototyp verhält. Der 3D-Druck schrumpft während der Abkühlungsphase um ungefähr 0,2 mm bis 0,4 mm, wodurch sich die Abstände der Schnapphaken verringern und den Einbau der Kugellager verhindern. Die Welle wird mit einer Fest-Los-Lagerung realisiert. Dabei fixiert das Festlager die Welle eindeutig in einer Position und das Loslager nimmt die Radialkräfte auf. Vorteile von dieser Art von Lagerung sind Minimierung des axialen Spiels und die Fähigkeit wechselnde Axialbelastungen aufzunehmen. Infolgedessen wird die Konstruktion abgeändert und ein zweites Kugellager im Deckel des Gehäuses vorgesehen. Die technischen Zeichnungen zu den Gehäusen der

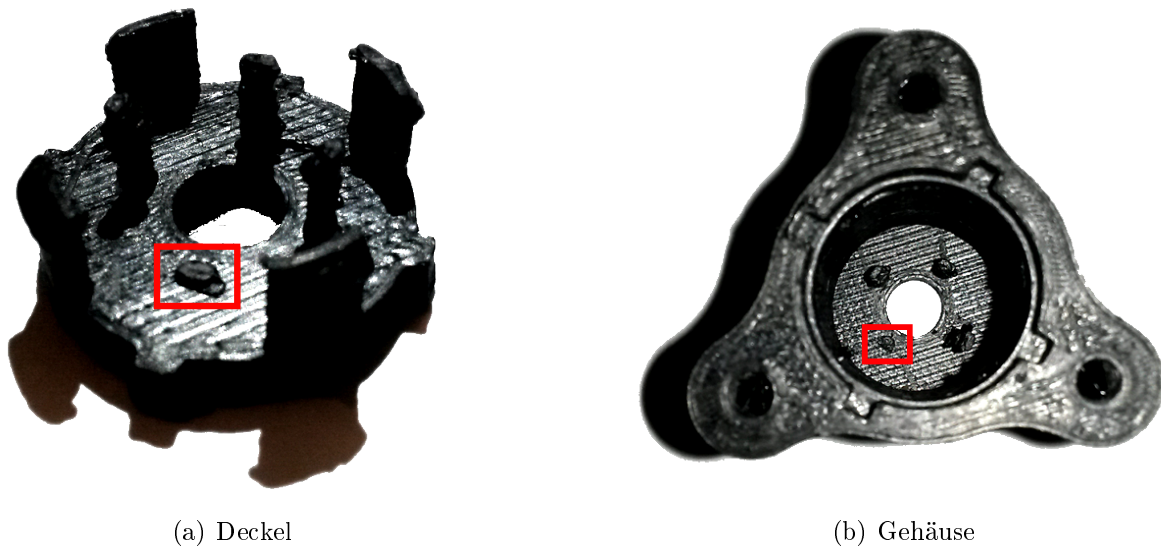


Abbildung 2.7.: Bruch der Schnapphaken

beiden Gelenkvarianten befinden sich im Anhang. Auch nach Optimierung der Geometrie und Anpassung an das Schrumpfverhalten des Kunststoffs verläuft von vier Versuchen der Einpassung des Kugellagers in die Schnapphaken nur einer erfolgreich. Bei den übrigen Versuchen geben die Schnapphaken nicht flexibel nach, sondern brechen direkt ab, wie auf Abbildungen in 2.7 zu sehen ist. Beim 3D-Druck treten neben des Schrumpfens, wel-

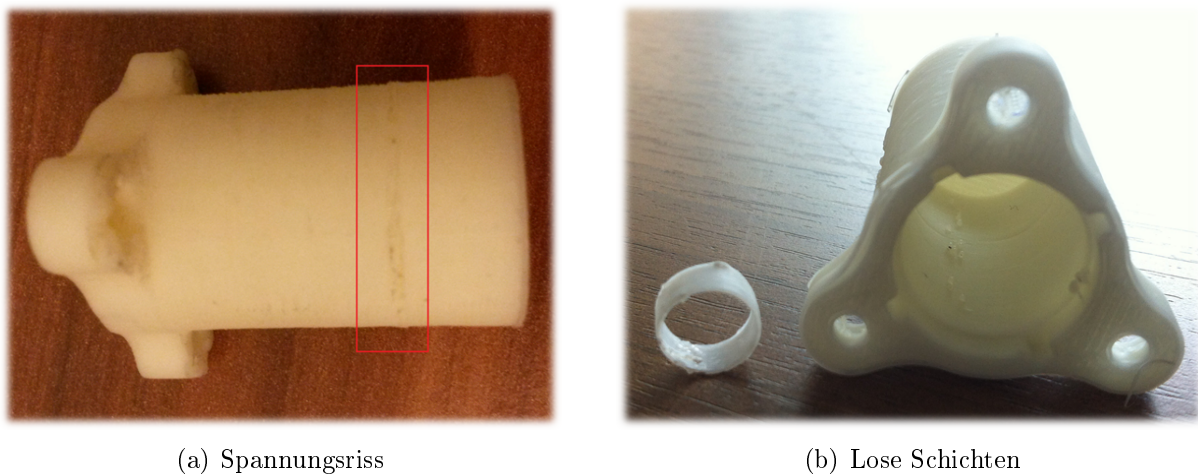


Abbildung 2.8.: Fehler beim 3D-Druck

ches die größte Herausforderung darstellt, noch weitere Probleme auf. Zum einen ereignen sich bei Temperaturschwankungen Spannungsrisse, wie auf Abbildung 2.8(a) zu sehen ist. Besonders das weiße ABS Filament der Firma German RepRap GmbH erweist sich als sehr anfällig für Spannungsrisse. Nachdem die Schnappverbindungen viele Probleme aufwerfen, wird alternativ auf eine Presspassung zurückgegriffen, wobei der Durchmesser der Passung wieder an das Schrumpfverhalten angepasst werden muss. Bei unzureichender

Temperatur des Extruders, welche bei ABS zwischen 210 und 260 °C beträgt, verbinden sich die einzelnen Schichten nicht ordnungsgemäß. Dies ist auf Abbildung 2.8(b) an der gelösten Halterung für das Kugellager erkennbar, welche links neben dem Gehäuse platziert ist.

2.3.3. Welle

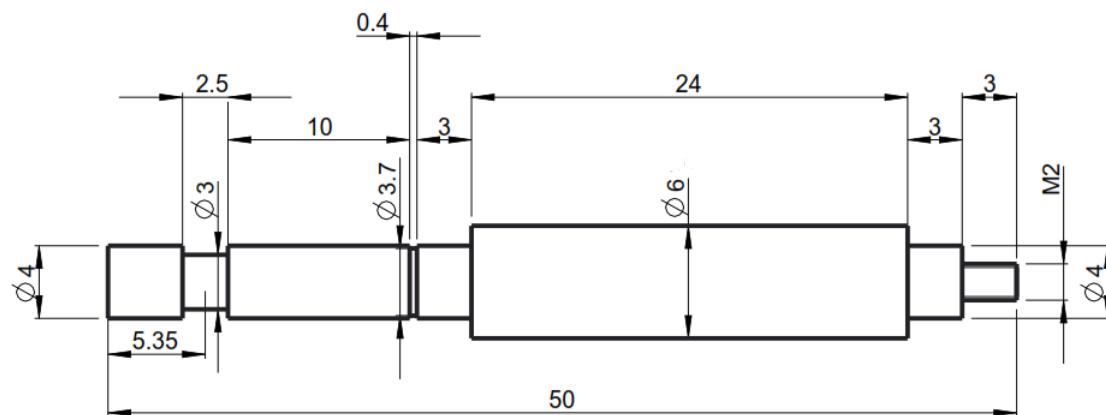


Abbildung 2.9.: Technische Zeichnung der Welle

Die Welle, die das Kardangeln über zwei Kugellager mit dem Gehäuse verbindet, muss Platz für zwei Kugellager mit einem Innendurchmesser von 4 mm bieten. Beide Kugellager müssen fest auf der Welle fixiert werden. Des Weiteren muss eine Befestigungsmöglichkeit für das Kardangeln vorgesehen werden. Durch eine Nut der Breite 2,5 mm (siehe 2.9) kann mithilfe einer Madenschraube das Kardangeln fest an der gewünschten Position fixiert werden. Die nächste Nut mit 0,4 mm Breite ist für einen Wellensicherungsring gedacht, der das Kugellager auf der einen Seite der Welle befestigt. Auf der anderen Seite wird eine M2 Sechskantmutter verbaut, für das sich am rechten Ende der Welle (Abb. 2.9) ein entsprechendes Gewinde befindet.

2.3.4. Stahlplatte und Verbindungswelle

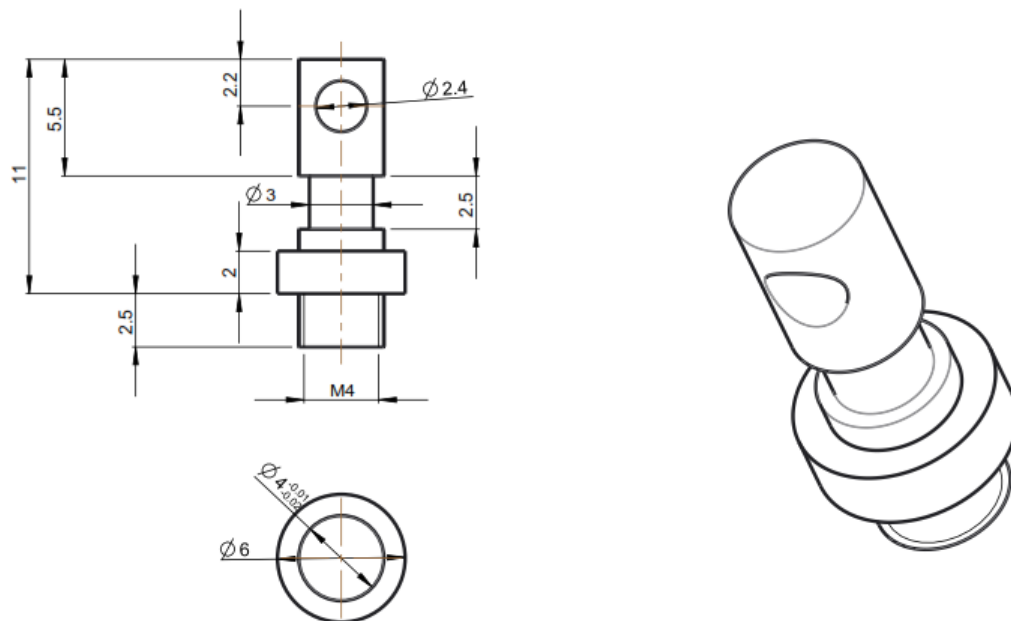


Abbildung 2.10.: Verbindungsstück zwischen Kardangeln und Stahlplatte

Um zwischen Elektromagnet und Gelenk eine Bindung zu schaffen, wird eine Fläche benötigt, die als ferromagnetisches Gegenstück für den Elektromagneten dient. Auf den Magneten wird in Abschnitt 4.2 tiefer eingegangen. Für den ersten Test am Quadrocopter wird nicht die gesamte Haltekraft des Magneten benötigt, da das UAV selbst nur 420 g beträgt. Außerdem soll bei der Konstruktion auf ein möglichst geringes Gewicht geachtet werden, sodass bereits eine 2,5 mm dicke Stahlplatte mit einem Durchmesser gleich dem Durchmesser des Magneten ausreicht, um die notwendige Haltekraft zu erbringen. Die volle Haltekraft von 400 N des Magneten entfaltet sich bei einer Platte mit 5 mm Dicke.

Das Verbindungsstück zwischen Stahlplatte und Kardangeln soll möglichst universell gestaltet werden, damit es auch bei anderen Varianten genutzt werden kann. Dazu wird neben der Nut zur Befestigung des Kardangelns auch eine Bohrung vorgesehen durch die eine M2 Schraube passt, welche mit einer Mutter fixiert werden kann.

2.3.5. Zusammenbau des Gelenks

Die Montage dieser Variante ist problemlos, jedoch kommt es durch das Schrumpfen des 3D-Drucks zu einem Überstehen des Deckels von 0,5 mm. Es ist zu beachten, dass als erstes beide Kugellager auf der Welle montiert werden sollten, bevor die M2 Mutter festgezogen und der Wellensicherungsring angebracht wird. Eventuell müssen die beiden Ösen seitlich vom Sicherungsring mit einem Seitenschneider entfernt werden, da es verschiedene Ausführungen des Sicherungsringes gibt und nur eine passende gefunden wurde.

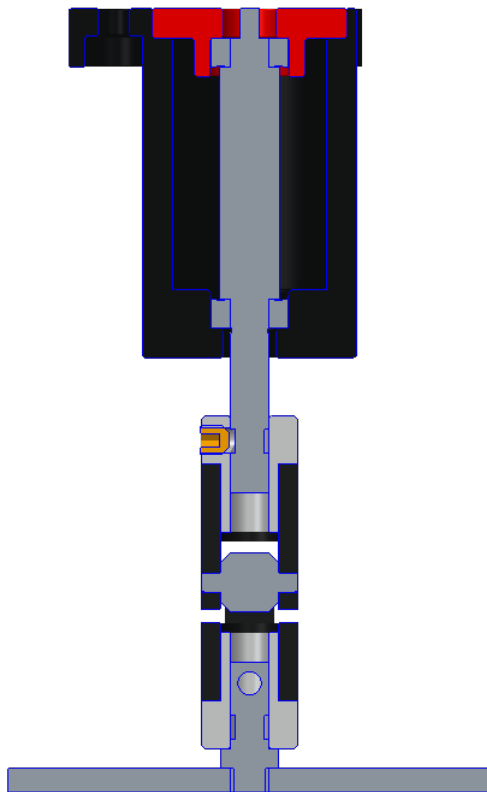


Abbildung 2.11.: Montiertes Gelenk im Schnitt

Im Anschluss dazu wird die Welle mit den angebrachten Kugellagern in das Gehäuse gesteckt und der Deckel aufgesetzt. Zum Schluss wird das Kardangeln und die Stahlplatte montiert. Abbildung 2.11 zeigt eine montierte Version des Kardangelns mit allen Komponenten im Schnitt. Zur Abgrenzung vom Gehäuse ist hierbei der Deckel rot eingefärbt. Auf Abbildung 2.12 ist links die erste Gelenkvariante in einer Position zu sehen, in der das Gelenk sich nicht weiter rotatorisch in der gleichen Ebene bewegen kann. Rechts daneben ist das Gehäuse aus PLA ohne Deckel dargestellt. Die Verbindungswelle löst sich bei langer rotatorischer Belastung, weshalb beim Prototyp *Loc-tite*, ein Schraubenkleber zur Sicherung von Schrauben, benutzt wird. Die Schraubverbindung eignet sich für den Prototypen, da der Durchmesser der Welle noch variiert werden kann und so weitere Gelenkvarianten montiert werden können.



Abbildung 2.12.: Produkt der Gelenkvariante 1

Tabelle 2.2.: Stückliste der Variante 1

Menge	Teil	Material	Gewicht [g]
1	Kardangelenk	Kunststoff und Messing	4,4
1	Gehäuse	ABS	3,1
1	Deckel	ABS	0,3
1	Welle	X14CrMoS17	4,1
1	Stahlplatte	X14CrMoS17	17,4
1	Verbindungswelle	X14CrMoS17	0,6
1	Wellensicherungsring	Stahl	-
1	M2 Mutter	Stahl	-
2	Kugellager	Stahl	0,1

2.4. Variante 2: Sphärisches Kugelgelenk

2.4.1. igubal-Clips-Gelenklager



Abbildung 2.13.: Heavy Duty - ECLM-08-04-HD[6]

Aufgrund der aufwändigen Verbindung zwischen Gehäuse und Gelenk soll eine zweite Variante ein einfacheres Verbindungskonzept verfolgen. Des Weiteren sollen hierbei lineare Bewegungen möglich sein. Die Verwendung von Schnapphaken wird entgegen des in der ersten Variante verwendeten Konzepts durch die Verwendung eines Spritzgussbauteils ermöglicht. Beim Hersteller igus werden zahlreiche Gelenklager angeboten, worunter auch das igubal®-Clips-Gelenklager Heavy Duty - ECLM-08-04-HD fällt (Abb. 2.13). Das Lager besitzt eine Bohrung mit einem 8 mm Durchmesser in der Kalotte und kann mithilfe von Schnapphaken in ein Material mit einer Dicke von $3,9 \pm 0,1$ mm arretiert werden [6]. Befestigt, kann das Gelenk eine kurzzeitige statische Belastung von 1750 N radial und 125 N axial aufnehmen. Unter einer dauerhaften Last, hält das Gelenk einer Belastung von radial 875 N und axial 60 N stand. Dies reicht jedoch für den Quadrocopter, da dieser selbst nur 420 g wiegt und eine maximale Nutzlast von 110 g besitzt. Das Gelenk kann maximal 28° gekippt werden. Die Herstellerangaben des Gewichts weichen um 0,8 g vom selbst gemessenen Wert ab. Weitere Angaben und Spezifikationen zu Varianten des Gelenks mit einem Kalottendurchmesser von 10 und 20 mm können aus Tabelle 2.3 entnommen werden.

Tabelle 2.3.: Varianten des Herstellers

øKalotte [mm]	max. Axiale Belastung [N]	Gewicht [g]	Kippwinkel [°]
8	60	2	28
10	75	3,1	24
20	165	7,9	21

2.4.2. Gehäuse

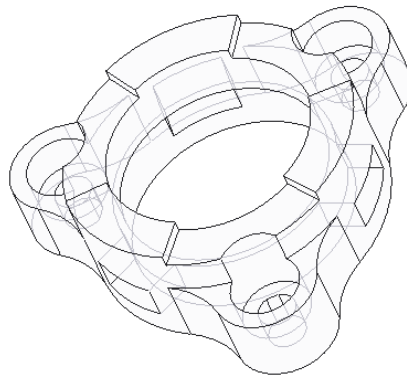


Abbildung 2.14.: Modell des Gehäuses für das Clips-Gelenklager

Das Gehäusedesign entspricht der ersten Variante und ist an das Clips-Gelenklager angepasst. Seitlich sind Aussparungen vorgesehen, damit die Schnapphaken bei Bedarf mithilfe eines Werkzeugs gelöst werden können. Wie auf Abbildung 2.14 zu sehen ist, existieren an der Stirnseite drei Aussparungen für das Clips-Gelenklager, um eine bündige Einpassung zu ermöglichen.

2.4.3. CFK-Rohre

Da es in der zweiten Gelenkvariante keiner zusätzlichen Kugellager bedarf, wird keine Stahlwelle benötigt, sondern es konnte eine vergleichbar stabile Komponente gesucht werden, die leichter ist und weniger Fertigungsaufwand benötigt. Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) wird seit ein paar Jahren in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Der große Vorteil von CFK gegenüber Stahl ist, dass es bei gleicher Belastbarkeit bis zu 80 % leichter ist. Zudem besitzt es eine ausgezeichnete Ermüdungsfestigkeit und wirkt schwingungsdämpfend, was eine bessere Laufruhe ermöglicht. CFK-Rohre, die sich als Ersatz für die Welle anbieten, werden auf verschiedene Arten gefertigt, wobei nicht bei allen Techniken jede Faserrichtung fertigungstechnisch realisierbar ist. Die Orientierung der Fasern spielt bei der Wahl eines Carbonrohrs eine große Rolle, da CFK quer zur Faserrichtung eine deutlich geringere Festigkeit und Steifigkeit aufweist. Das hier verwendete CFK-Rohr von der Firma Carbotech wurde über das Strangziehverfahren hergestellt. Dies ist das preisgünstigste Verfahren mit annehmbarer Qualität, wobei jedoch bei ein paar Materialeigenschaften Abstriche gemacht werden müssen. Die Bearbeitung der Rohre gestaltete sich als schwierig, weil beim Bohren und Sägen mit Diamantschneideblatt und Diamantbohrer die Ränder leicht ausfransen. Für zukünftige Gelenkvarianten sind deshalb Rohre, die durch das aufwendigere Prepreg-Autoklaviervverfahren hergestellt werden, den verwendeten Carbonrohren vorzuziehen. Beim Prototypen wird ein CFK-Rohr mit 6 mm Durchmesser in ein Rohr mit 8 mm Durchmesser und 8 mm Länge geklebt, um den maximalen Kippwinkel um ungefähr 3° zu erweitern.

2.4.4. Zusammenbau des Gelenks



Abbildung 2.15.: Produkt der Gelenkvariante 2

Der Zwei-Komponentenkleber von TOOLCRAFT für die Verklebung ist, anders als auf der Verpackung beschrieben, auch nach einer halben Stunde nicht handfest ausgehärtet. Als Alternative wurde Sekundenkleber benutzt, welcher die CFK-Rohre mit dem Gelenk verbanden. Das CFK-Rohr ist mittels einer M2 Schraube und einer dazugehörigen Mutter ausreichend fest an der Verbindungswelle der Stahlplatte befestigt. Das ermöglicht auch hier die Montage unterschiedlicher Gelenkvarianten, zum Beispiel mit verschiedenen Rohrdurchmessern. Falls ein weiteres Gewichtsersparnis notwendig ist, ergibt sich die Möglichkeit die Stahlplatte durch eine Klebverbindung direkt an der Welle zu befestigen. Für die vorläufige Version wird anhand von Schätzungen ein 33 mm langes Rohr verwendet. Für zukünftige Tests existieren bereits gesägte Rohre mit der Länge 23 und 44 mm. Die Tabelle 2.4 listet alle benötigten Teile für die Montage der zweiten Gelenkvariante auf.

Tabelle 2.4.: Stückliste Variante 2

Menge	Teil	Material	Gewicht [g]
1	igubal-Clips-Gelenklager	igumid G und iglidur W300	0,9
1	Gehäuse	ABS	1,2
1	Carbonrohr	CFK	0,6
1	Stahlplatte	X14CrMoS17	17,4
1	Verbindungswelle	X14CrMoS17	0,6
1	M2 Schraube	-	-
1	M2 Mutter	-	-

2.5. Vergleich der Gelenkvarianten

Tabelle 2.5.: Variante 1 Kardangelenk

Gewicht	Stahlplatte	Verbindung	Welle	Kardangelenk	Gehäuse
in [g]	17,4	0,6	4,1	4,4	3,5
Gesamt [g]	30,0				

Gewichte der Komponenten

Tabelle 2.6.: Variante 2 Kugelgelenk

Gewicht	Stahlplatte	Verbindung	CFK Rohre	igus Lager	Gehäuse
in [g]	17,4	0,6	0,6	0,9	1,2
Gesamt [g]	20,7				

Gewichte der Komponenten

Um das Gewicht der Gelenkvarianten zu vergleichen, werden zwei Tabellen mit dem Gewicht der einzelnen Komponenten erstellt. Bei den grau unterlegten Werten handelt es sich um die wichtigen Werte, da beide Varianten mit einer Stahlplatte über eine Verbindungswelle befestigt sind. Bei der Welle und dem CFK-Rohr in den Tabellen 2.5 und 2.6 werden das Gewicht des Kardangelenks, die Gewichte von beiden Kugellagern und das Gewicht des Wellensicherungsringes miteinbezogen. Beim CFK-Rohr sind zusätzlich das Gewicht der M2 Schraube und der dazugehörigen Mutter inkludiert. Zwar ist der Gesamtunterschied von 9,3 g bei dem Gewicht der einzelnen Varianten beim Quadrocopter nicht von großer Bedeutung, doch kann sich der Unterschied bei einer Skalierung für ein größeres Modell bemerkbar machen. Beispielsweise hat mehr Gewicht eine kürzere Flugdauer zur Folge. Auch ist zu bedenken, dass ein größeres Gewicht am Ende des Gelenks Schwingungen auslösen kann, die das Flugverhalten beeinträchtigen.

Das Kardangelenk kann bis zu 90° gekippt werden, wohingegen das Kugelgelenk nur im Stande ist sich um 31° zu neigen. Es ist jedoch zu beachten, dass das Kardangelenk ab einem Neigungswinkel von 35° keine gleichmäßige Rotation mehr vollführen kann. Durch den Fakt, dass in der Realität ein Kippwinkel von 35° nur in sehr seltenen Fällen erreicht wird, kann die Nichtlinearität vorerst vernachlässigt werden.

Wird der Gewichtsunterschied aus den Tabellen 2.5 und 2.6 prozentual betrachtet, wiegt die Gelenkvariante mit dem Kardangelenk rund 31 % mehr als die Variante mit dem Kugelgelenk. Somit sind das Gewicht und die Maße der Varianten für die Wahl der Gelenkvariante ausschlaggebend. Folglich fällt die Wahl auf Variante 2, welche das igubal-Clips-Gelenklager verwendet.

3. Kinematische Analyse

3.1. Kinematik

In den folgenden Kapiteln wird die Kinematik der einzelnen Gelenke untersucht. Die Kinematik ist ein Teilgebiet der Mechanik, welches sich mit der Bewegung von Punkten und Körpern im Raum befasst. Hierbei werden Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung unter Vernachlässigung der Kraft betrachtet [14].

Folgende Beziehungen zwischen Ort \mathbf{o} , Geschwindigkeit \mathbf{v} und Beschleunigung \mathbf{a} gelten für jeden Punkt unabhängig vom gewähltem Koordinatensystem:

$$\mathbf{v} := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{o}}{\Delta t} = \frac{d}{dt} \mathbf{o} = \dot{\mathbf{o}} \quad (3.1)$$

und

$$\mathbf{a} := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d}{dt} \mathbf{v} = \dot{\mathbf{v}}. \quad (3.2)$$

Dies bedeutet, dass \mathbf{o} , \mathbf{v} und \mathbf{a} nur über die Zeit im Zusammenhang zueinander stehen.

3.1.1. Rotationsmatrizen

Rotationsmatrizen \mathbf{R} sind 3×3 - Matrizen und bilden die orthogonale Gruppe $SO(3)$ [12].

Durch die Multiplikation von \mathbf{R} mit einem Vektor \mathbf{v} wird eine Drehung ausgeführt, die in einen Vektor \mathbf{v}' resultiert, der betragsmäßig gleich bleibt:

$$\mathbf{v}' = \mathbf{R}\mathbf{v}. \quad (3.3)$$

Die Determinante von \mathbf{R} resultiert in ± 1 , das heißt

$$\det \mathbf{R} = \pm 1. \quad (3.4)$$

Das Transponieren \mathbf{R}^T von \mathbf{R} ergibt immer \mathbf{R}^{-1} , was die inverse Rotation

$$\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1} \quad (3.5)$$

beschreibt.

Aus der Multiplikation von \mathbf{R} mit \mathbf{R}^T geht die Einheitsmatrix

$$\mathbf{I} = \mathbf{R}\mathbf{R}^{-1} \quad (3.6)$$

hervor. Zusammenfassend kann $SO(3)$ folgend beschrieben werden:

$$SO(3) = \{\mathbf{R} | \mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \det \mathbf{R} = \pm 1, \mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1}, \mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}\}. \quad (3.7)$$

In einem dreidimensionalen, rechtshändigen Koordinatensystem kann mit Hilfe von \mathbf{R} ein Vektor \mathbf{v} um einen Winkel α einer jeweiligen Achse gedreht werden.

Um eine Rotation um die x-Achse zu erhalten wird

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

mit einem Vektor multipliziert. Analog gilt gleiches für

$$\mathbf{R}_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

und

$$\mathbf{R}_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

für die y-, beziehungsweise z-Achse.

3.1.2. Euler-Winkel

Um die Lage eines Objekts im Raum zu bestimmen, können Euler-Winkel verwendet werden. Hierbei handelt es sich um eine Konvention von aufeinanderfolgenden Drehungen um bestimmte Koordinatenachsen mit den Rotationswinkeln ψ , θ und φ . Es sind 12 Kombinationsmöglichkeiten der Drehungen möglich [12]. Die einzelnen Drehmatrizen werden miteinander multipliziert, um die Drehmatrix A für Euler-Winkel zu erhalten. In der Luft- und Raumfahrt hat sich die sogenannte z, y', x'' Konvention durchgesetzt. Die Orientierung folgt der Rechte-Hand-Regel. Bei der z, y', x'' -Konvention wird als erstes eine Rotation ψ um die z -Achse, danach eine Rotation θ um die y -Achse und zuletzt eine Rotation φ um die neu entstandene x -Achse vollführt [1].

Gier-,Nick- und Rollwinkel (ψ, θ, φ)

ψ Rotationswinkel um die z -Achse

θ Rotationswinkel um die neue y -Achse

φ Rotationswinkel um die neue x -Achse

Wie beschrieben gilt für \mathbf{R}_{IK} :

$$\mathbf{R}_{IK} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{R}_z(\psi)} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}}_{\mathbf{R}_y(\theta)} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}}_{\mathbf{R}_x(\varphi)}. \quad (3.11)$$

Mit den Abkürzungen $s(\cdot) := \sin(\cdot)$ und $c(\cdot) = \cos(\cdot)$ entsteht aus (3.11):

$$\mathbf{R}_{IK} = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & s(\psi)c(\varphi) + c(\psi)s(\theta)s(\varphi) & s(\psi)s(\varphi) - c(\psi)s(\theta)c(\varphi) \\ -s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\varphi) - s(\psi)s(\theta)s(\varphi) & c(\psi)s(\varphi) + s(\psi)s(\theta)c(\varphi) \\ s(\theta) & -c(\theta)s(\varphi) & c(\theta)c(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Die Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ befindet sich im körperfesten Bezugssystem. Die Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ kann mit den Eulerschen Winkel folgendermaßen beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega} &= \begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{R}_y(\theta) \begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \mathbf{R}_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\theta) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Um nachzuweisen, dass für die Lösungen von (3.13) eine Singularität vorhanden ist, wird wie folgt nach den Ableitungen der Eulerwinkel umgestellt:

$$\begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \frac{1}{\cos(\theta)} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) \cos(\theta) & 0 \\ -\cos(\psi) \sin(\theta) & \sin(\psi) \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}. \quad (3.14)$$

Dies zeigt dass für einen Wert von $\theta = \pm(2k+1) \cdot \frac{\pi}{2}, k \in \mathbb{N}_0$ eine Singularität existiert.

3.1.3. Denavit-Hartenberg-Parameter

Die Denavit-Hartenberg-Transformation beschreibt die Transformation von Ortskoordinatensystem innerhalb von kinematischen Ketten. Obwohl es beim vorliegenden Gelenk möglich ist, über geometrische Bedingungen die Position des Quadrocopters zu berechnen, ist dies bei komplexeren Systemen nicht möglich. Falls eine einfache Analyse keine Resultate bezüglich der Position des Systems erbringt, muss die Problemstellung mit einer effizienteren Systematik gelöst werden. Hierbei hilft die D-H Konvention. Mithilfe von D-H-Parametern kann die Kinematik eines Gelenks beschrieben werden. Diese Parameter werden auch bei der kinematischen Analyse von seriellen Robotern verwendet.

Bei dieser Konvention ergibt das Produkt der einzelnen Basistransformationen die Transformationsmatrix A_I [13, S.75]. Zum Aufstellen der Matrix werden die Denavit-Hartenberg-Parameter benötigt, welche die Transformation beschreiben.

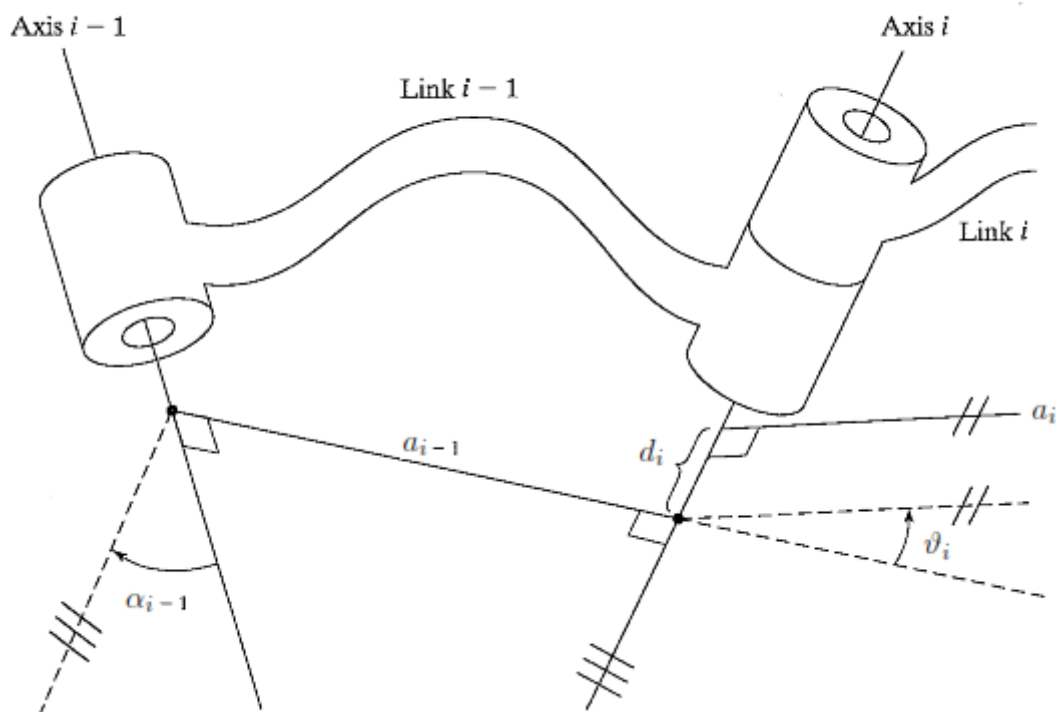


Abbildung 3.1.: Veranschaulichung der D-H-Parameter [1]

α_i	Winkel zwischen der aktuellen Achse z_i und der Achse z_{i-1}
a_i	Länge der Verbindung
d_i	Abstand zwischen der aktuellen Achse x_i und der Achse x_{i-1}
ϑ_i	Gelenkwinkel Abstand zwischen der aktuellen Achse x_i und der Achse x_{i-1}

Um die Matrix A_I zu erhalten, werden die einzelnen Basistransformationen wie folgt miteinander multipliziert:

$$\mathbf{A}_I = R_{z,o_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} R_{x,a_i}. \quad (3.15)$$

Mit der bereits eingeführten Konvention für Sinus und Kosinus resultiert folgende Matrix für \mathbf{A}_I :

$$\mathbf{A}_I = \underbrace{\begin{bmatrix} c(\vartheta_i) & -s(\vartheta_i) & 0 & 0 \\ s(\vartheta_i) & c(\vartheta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{R_{z,o_i}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{Trans_{z,d_i}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{Trans_{x,a_i}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\alpha_i) & -s(\alpha_i) & 0 \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{R_{x,a_i}} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{A}_I = \left[\begin{array}{ccc|c} c(\vartheta_i) & -s(\vartheta_i)c(\alpha_i) & s(\vartheta_i)s(\alpha_i) & a_i c(\vartheta_i) \\ s(\vartheta_i) & c(\vartheta_i)c(\alpha_i) & -c(\vartheta_i)s(\alpha_i) & a_i s(\vartheta_i) \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & \\ & Rot & & Trans \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]. \quad (3.17)$$

Die letzte Spalte in der Formel (3.17) beschreibt die Translation, wobei die ersten drei Spalten die Rotation der Transformation beschreibt. In der folgenden Sektion wird die D-H Konvention auf die entworfenen Gelenkvarianten nach dem Schema:

1. Festlegung des Basis-Koordinatensystems
2. Transformation zur Erzeugung aller Koordinatensysteme
3. Bestimmung der Parameter aus den Transformationen
4. Denavit-Hartenberg-Matrizen ausrechnen
5. Bildung von $\sum_{i=0}^i A_i$

angewandt.

3.2. Analyse

3.2.1. Planarer Fall

Für die Analyse kann folgendes Modell für beide Gelenkvarianten benutzt werden:

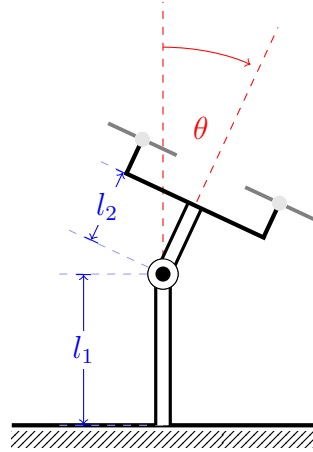


Abbildung 3.2.: Schematische 2D Skizze

Die Länge l_1 beschreibt den Abstand zwischen Stahlplatte und dem Gelenk, wobei die Stahlplatte als inertial fest angenommen wird. Der Abstand zwischen dem Gelenk und dem UAV ist mit l_2 beschriftet. Die Größe der Auslenkung des Quadropters ist als θ abgebildet. Aus der folgenden Tabelle können die Maße für die jeweilige Variante des Gelenks entnommen werden.

Tabelle 3.1.: Geometrische Abmaße der Gelenke

Variante	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{Ges} [mm]	θ_{max} [°]
Kardangelen	23,08	59,58	82,86	90
Kugelgelenk	30,5	12,15	42,65	30

Maße der zwei Gelenke im Vergleich

Über geometrische Bedingungen gehen aus der Abbildung 3.2

$$x_{\text{ges}} = \sin(\theta)l_2 \quad (3.18)$$

und

$$y_{\text{ges}} = \cos(\theta)l_2 + l_1 \quad (3.19)$$

als Formeln für die Position hervor. Aus den Formeln (3.18) und (3.19) ergibt sich

$$\mathbf{o} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\theta)l_2 \\ \cos(\theta)l_2 + l_1 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

für den Positionsvektor. Wird (3.1) auf (3.20) angewandt ergibt sich:

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\theta} \cos(\theta) l_2 \\ -\dot{\theta} \sin(\theta) l_2 \end{pmatrix}. \quad (3.21)$$

Für (3.2) auf (3.21) angewandt lautet das Resultat:

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\ddot{\theta} \cos(\theta) l_2 - \dot{\theta}^2 \sin(\theta) l_2) \\ (-\ddot{\theta} \sin(\theta) l_2 - \dot{\theta}^2 \cos(\theta) l_2) \end{pmatrix}. \quad (3.22)$$

Als Beweis, dass das Anwenden der D-H-Konvention zum gleichen Ergebnis wie (3.20) führt, wird die Konvention im Folgenden auf die Gelenke angewandt. Um beide Gelenke mit der D-H-Konvention untersuchen zu können, werden als erstes die Glieder in Abbildung 3.3 festgelegt und die Koordinatensysteme eingetragen. Zur Veranschaulichung wird das Koordinatensystem nicht gleich mit $\vartheta_0=90^\circ$ gezeichnet.

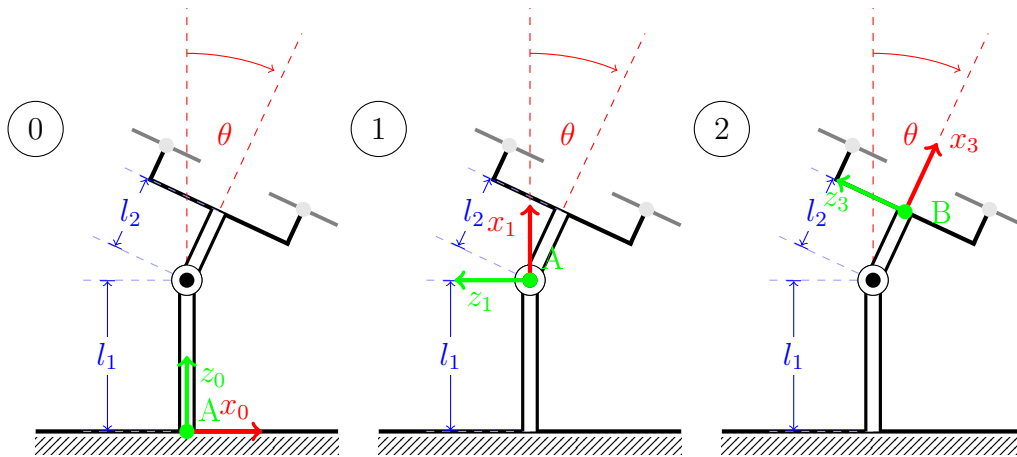


Abbildung 3.3.: Festlegung der Koordinatensysteme

Das Glied 0 wird im Koordinatenursprung eingetragen. Um vom Glied 0 auf Glied 1 zu kommen wird das Koordinatensystem um 90° gegen den Uhrzeigersinn rotiert und um l_1 verschoben. Der Übergang von Glied 1 auf Glied 2 erfolgt durch Translation um l_2 entlang x_1 und Rotation um θ .

Entsprechend diesen Vorgaben lassen sich aus Abb. 3.3 die D-H-Parameter (siehe Tab. 3.2) ableiten.

Tabelle 3.2.: D-H-Parameter 2D

Link	$\alpha[^\circ]$	$a_i[\text{mm}]$	$d_i[\text{mm}]$	$\vartheta[^\circ]$
0	0	0	0	0
1	0	l_1	0	90°
2	0	l_2	0	$90^\circ - \theta$

Im zweidimensionalen Fall existieren nur drei Freiheitsgrade, weshalb in (3.17) nur der Teil für die Translation im Folgendem betrachtet wird. Die Parameter aus Tabelle 3.2 in (3.17) eingesetzt ergeben für die einzelnen Glieder:

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_0 \cos(\vartheta_0) \\ a_0 \sin(\vartheta_0) \\ d_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_1 \cos(\vartheta_1) \\ a_1 \sin(\vartheta_1) \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

und

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_2 \cos(\vartheta_2) \\ a_2 \sin(\vartheta_2) \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - \theta)l_2 \\ \sin(90^\circ - \theta)l_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta)l_2 \\ \cos(\theta)l_2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Als nächstes werden die einzelnen Glieder aufsummiert:

$$A_{ges} = \sum_{i=0}^i A_i = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{A_0} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{A_1} + \underbrace{\begin{bmatrix} \sin(\theta)l_2 \\ \cos(\theta)l_2 \\ 0 \end{bmatrix}}_{A_2} = \begin{bmatrix} \sin(\theta)l_2 \\ \cos(\theta)l_2 + l_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

Durch den Vergleich der Ergebnisse von (3.20) und (3.26) zeigt sich, dass beide Ansätze zum gleichen Ergebnis führen.

3.2.2. Dreidimensionaler Fall

Die Transformationsmatrix (3.12) multipliziert mit dem Vektor $\vec{l}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_2 \end{bmatrix}$ und summiert

mit $\vec{l}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix}$ ergibt:

$$\mathbf{o}_{3d} = \vec{l}_1 + \mathbf{R}_{IK} \vec{l}_2 = \begin{bmatrix} (\sin(\psi) \sin(\varphi) - \cos(\psi) \sin(\theta) \cos(\varphi))l_2 \\ (\cos(\psi) \sin(\varphi) + \sin(\psi) \sin(\theta) \cos(\varphi))l_2 \\ \cos(\theta) \cos(\varphi)l_2 + l_1 \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Für die Geschwindigkeit ergibt sich mit (3.1):

$$\mathbf{v}_{3d} = \dot{\mathbf{o}}_{3d} = \begin{bmatrix} (\dot{\psi}c(\psi)s(\varphi) + \dot{\varphi}c(\varphi)s(\psi) + \dot{\psi}s(\psi)s(\theta)c(\varphi) - \dot{\theta}c(\theta)c(\psi)c(\varphi) + \dot{\varphi}s(\varphi)s(\theta)c(\psi))l_2 \\ (-\dot{\psi}s(\psi)s(\varphi) + \dot{\varphi}c(\varphi)c(\psi) + \dot{\psi}c(\psi)s(\theta)c(\varphi) + \dot{\theta}c(\theta)s(\psi)c(\varphi) - \dot{\varphi}s(\varphi)s(\theta)s(\psi))l_2 \\ (-\dot{\theta}s(\theta)c(\varphi) - \dot{\varphi}s(\varphi)c(\theta))l_2 \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Die Berechnung für die Beschleunigung erfolgt analog.

3.3. 3D-Plot des Arbeitsraums mit Bewertung

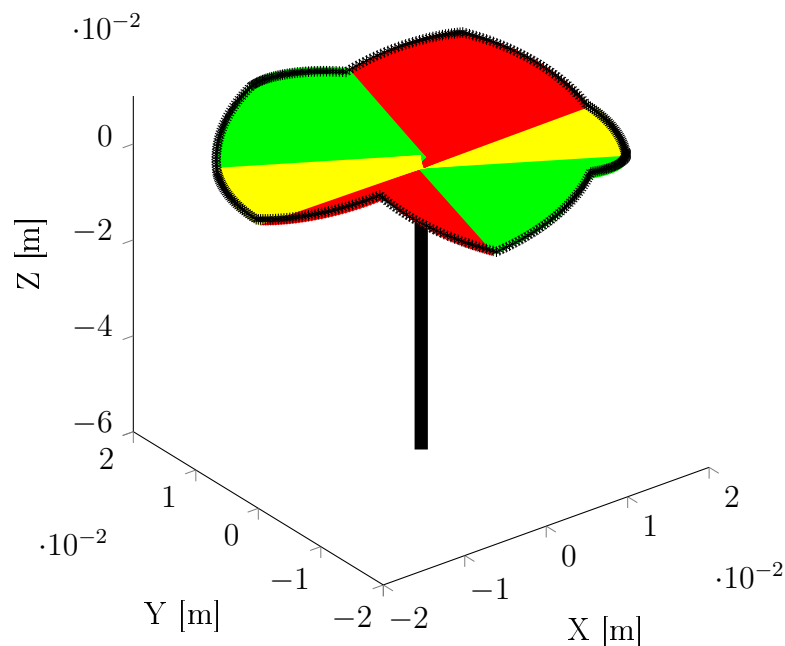


Abbildung 3.4.: 3D-Plot des Arbeitsraums

Bei der Kinematik im zwei- und dreidimensionalen Raum unterscheiden sich Kardan- und Clips-Gelenklager nicht. Das Kardangeln weist jedoch bei rotatorischen Bewegungen ab einem Kippwinkel von 35° Unregelmäßigkeiten bei der Bewegung auf, wie auf dem Matlab-plot auf Abbildung 3.4 zu sehen ist. Auf dem Plot sind die Bewegung des Kardangelns bei maximaler Auslenkung dargestellt. Die Daten zur Erstellung des Plots sind per Hand ausgemessen. Im Gegensatz zum Kugelgelenk, welches bei jedem Kippwinkel eine lineare Rotation vollführt, vergrößert sich der Bereich in dem das Gelenk eine ungleichmäßige Bewegung ausführt mit Anstieg des Kippwinkels. Im gelben Bereich in Abbildung 3.4 ist das Kardangeln um 90° gekippt. Dies ist zugleich die maximale Position des Gelenks. Die Kupplungsklaue des Gelenks verursachen bei der Rotation zuerst eine Reduktion des Winkels um 35° , der dann wieder auf 90° ansteigt, was in Abbildung 3.4 als roter Bereich dargestellt ist. Nachdem die Kupplungsklaue überwunden ist, erfolgt erneut ein Abfall des Winkels um 20° , dieser steigt daraufhin wieder auf 90° an. Es entsteht ein geringerer Abfall und Anstieg des Winkels, da der sich bewegende Teil des Gelenks um die eigene Achse rotiert und sich so eine Kupplungsklaue über die andere Kupplungsklaue abrollt. Der Rotationsablauf vom gelben Bereich über den roten und grünen Bereich wiederholt sich bei einer Drehung um 360° einmal. Der Bereich zwischen dem roten und grünen Bereich ist kritisch, da sich das Gelenk in einem Deadlock befindet. Ohne ein leichtes Anheben des Gelenks kann sich dieses nicht weiterbewegen. Zumal größere Auslenkungen sehr selten vorkommen, sind Rotationen beim Kardangeln bis ungefähr 40° Auslenkung tolerierbar. Falls es zu größeren Auslenkungen kommt, ist die zweite Gelenkvariante der ersten bevorzugt zu montieren.

4. Implementierung

4.1. Adapter

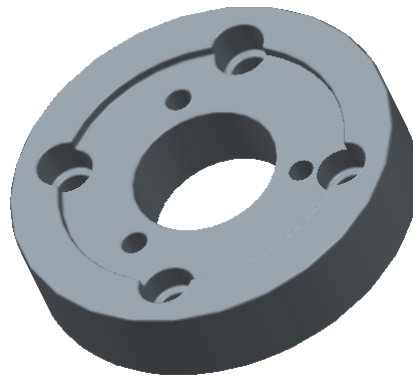


Abbildung 4.1.: CAD Modell des Adapters

Zur Montage des Elektromagneten auf dem Roboterarm musste ein Adapter konstruiert und gedruckt werden, der auf den Kameraflansch passt, welcher am Roboterarm angebracht ist. Mittels sechs M4 Zylinderschrauben wird der Adapter am Flansch befestigt. Es ist zu beachten, dass der Magnet erst von der Unterseite des Adapters festgeschraubt werden sollte, bevor er auf dem Arm befestigt wird. Durch die Verwendung von PLA kann der Adapter mit unveränderten Daten aus dem CAD-Modell sehr passgenau gedruckt werden. Für einen Außeneinsatz des Systems ist ein Adapter aus ABS zu bevorzugen, da das Material witterungsbeständiger ist.

4.2. Elektromagnet



Abbildung 4.2.: Elektromagnet mit Adapter

Tabelle 4.1.: Kennwerte des Elektromagneten

Modell	Gewicht [g]	Nennleistung [W]	Spannung [V]	Haltekraft [N]
ITS-MS 5030	350	8,0	12,0	400

Bei dem gewählten Elektromagneten handelt es sich um ein Produkt von Intertec Components GmbH. Das vorliegende Modell ist ein Haftmagnet. Er besitzt einen offenen magnetischen Kreis und ist im aktiven Zustand in der Lage, ferromagnetische Gegenstände festzuhalten. Der Vorteil gegenüber Dauermagneten ist, dass bei einem Versagen des Roboterarms das UAV nicht mehr an gebunden ist und sich vom Arm entfernen kann. Die volle Haltekraft des Magneten entfaltet sich erst bei einer Stahlplatte von mindestens 5 mm Dicke, was beim Einsatz der Drohne wie in Sektion 2.3.4 beschrieben, nicht notwendig ist. M3 Schrauben fixieren den Magneten an einem Adapter, welcher auf dem Kameraflansch am Ende des Roboterarms montiert werden kann. Zur Ansteuerung und zum Schalten des Magneten wird ein Relais-Modul von C-Control benutzt. Da dieses Modul jedoch mit 5 Volt arbeitet, muss ein Adapter konzipiert werden, der die 12 Volt Versorgungsspannung auf 5 Volt transformiert. Hierzu wird in EAGLE ein Layout für eine Platine mit SMD (surface-mounted device) Bauteilen erstellt, die aufgrund langer Lieferzeiten und zu geringer Stückzahl nicht gefertigt wird. Der Prototyp dieser Platine wird deshalb alternativ auf einer Lochrasterplatine mit PIH (Pin-in-hole technology) Bauteilen gefertigt. Auf der Abbildung 4.3 befindet sich links eine Schraubklemme, die an die Versorgungsspannung des Computers angeklemt wird. Mittig ist der Spannungswandler angeschlossen, der wiederum rechts mit einem 2x20 Gegenstück zur Doppelpinleiste

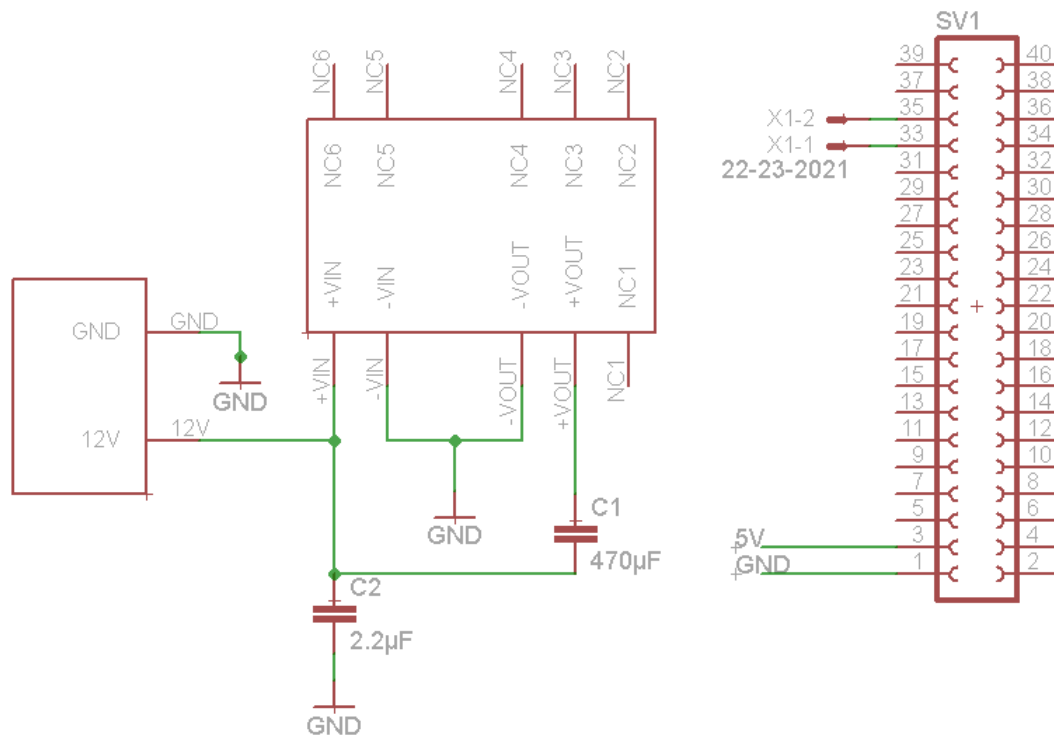


Abbildung 4.3.: Schaltplan für Spannungswandler

des Relais-Moduls verbunden ist. Das Relais-Modul kann somit direkt angesteckt und in einem Gehäuse befestigt werden.

4.3. Systemtest

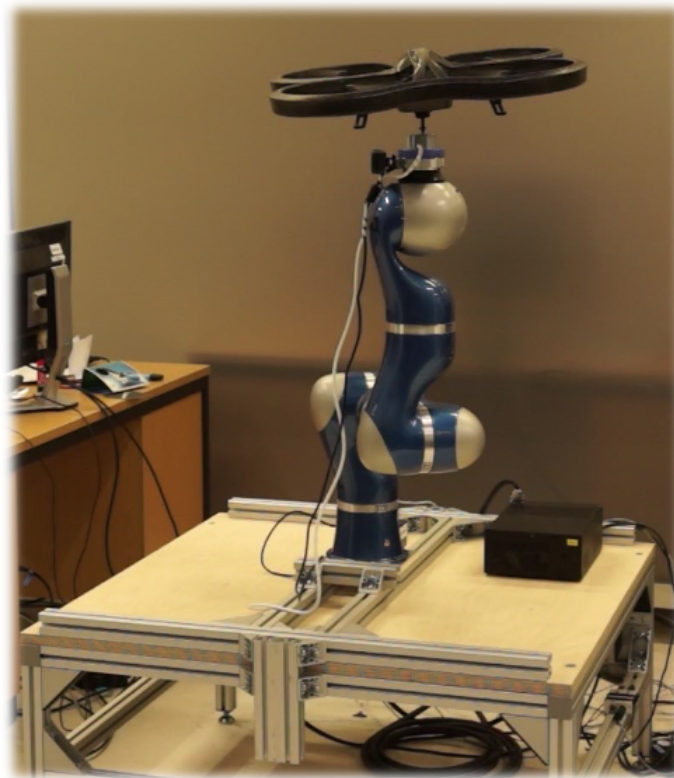


Abbildung 4.4.: AR.Drone auf dem LBR

Der Systemtest soll verifizieren, dass die AR.Drone das Gewicht der jeweiligen Gelenkvarianten heben kann und trotz Zusatzgewicht ein stabiles Flugverhalten aufweist. Sowohl Schwebeflug als auch mehrere Manöver in verschiedene Richtungen laufen im freien Flug reibungslos ab. Auf Abbildung 4.4 ist die AR.Drone mit der zweiten Gelenkvariante am Elektromagneten zu sehen. Die AR.Drone kann sich bei kraftschlüssigem Kontakt zwischen Drohne und LBR um ungefähr 31° neigen und um 360° rotieren. Dies bestätigt, dass die rotatorischen Freiheitsgrade nicht eingeschränkt sind und die Mindestanforderung eines Kippwinkels von 20° erfüllt ist.

Die Stahlplatte, die im Abschnitt 2.3.4 eingeführt wurde, stellt sich mit ihrer Dicke von 2,5 mm als ausreichend heraus um das UAV zu halten. Jedoch erwärmt sich die Stahlplatte im aktiven Betrieb des Elektromagneten durch die induzierten Wirbelströme des Magneten. Bei einer Weiterentwicklung gilt es dies zu beachten.

Über ein Modell in Matlab Simulink wird der auf dem LBR montierte Elektromagnet angesteuert. Der Elektromagnet ist über einen General Purpose Input/Output (GPIO) Port mit einem Computer, auf dem ein Echtzeitbetriebssystem installiert ist, verbunden. Auf Abb. 4.5 ist zu erkennen, wie beide Computer miteinander vernetzt sind. An der Stromversorgung ist neben dem standardmäßigen Notausschalter auch ein kabelloser Notausschalter angeschlossen.

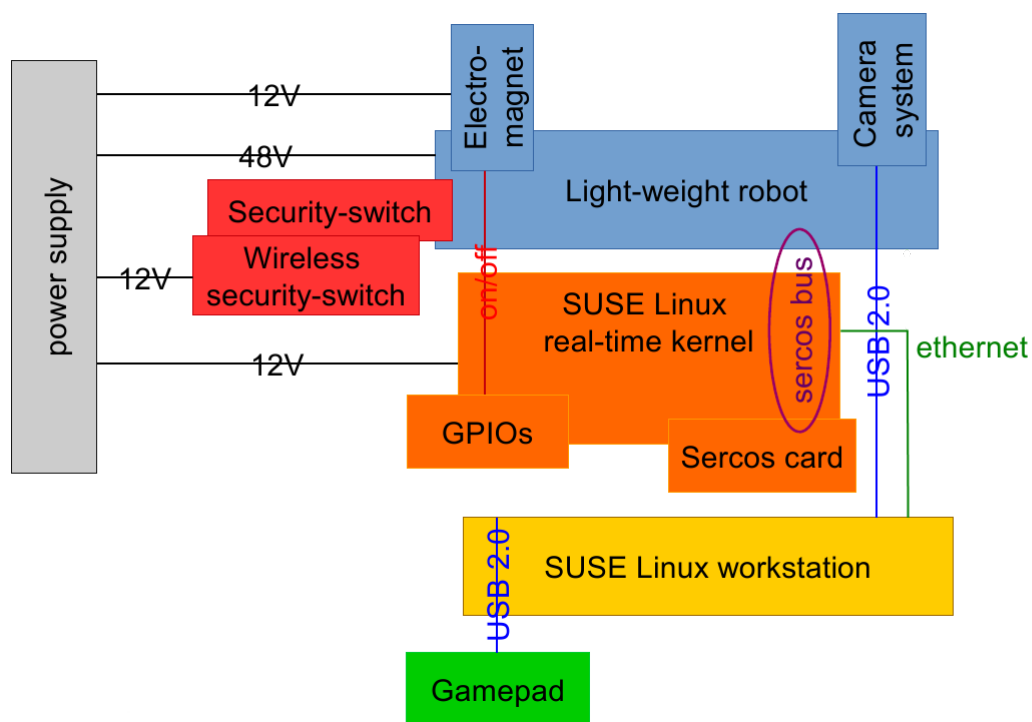


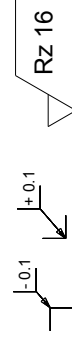
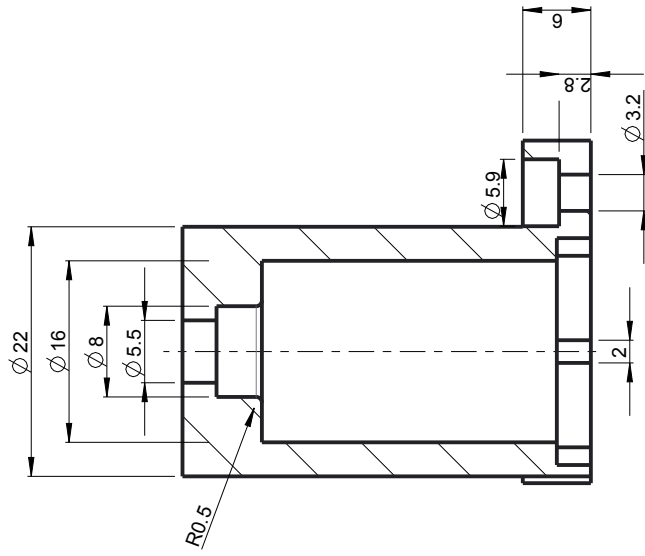
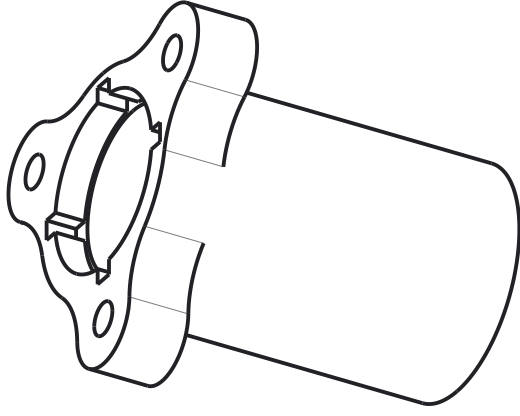
Abbildung 4.5.: LBR Hardware Layout



5. Zusammenfassung und Ausblick

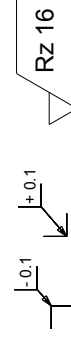
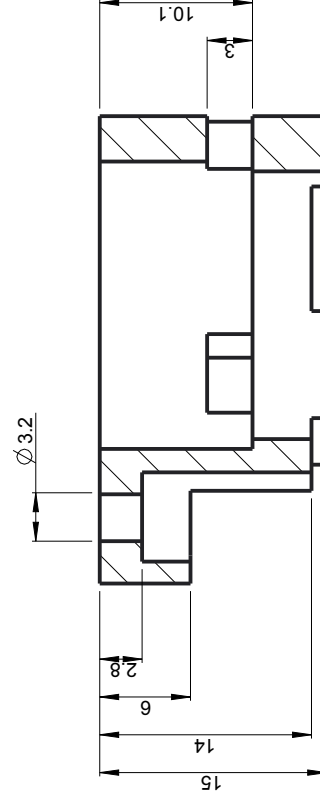
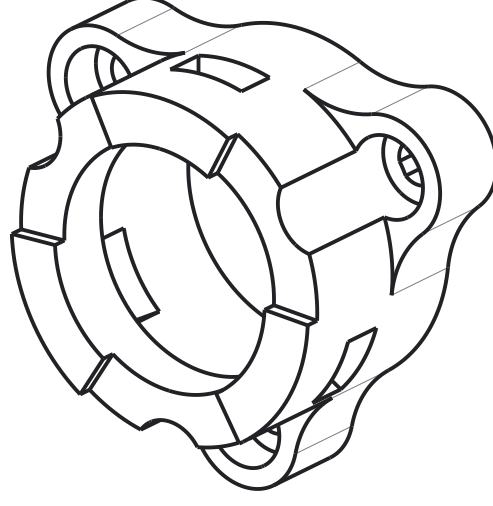
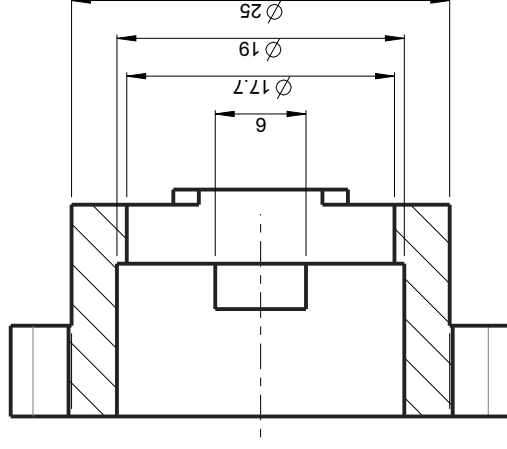
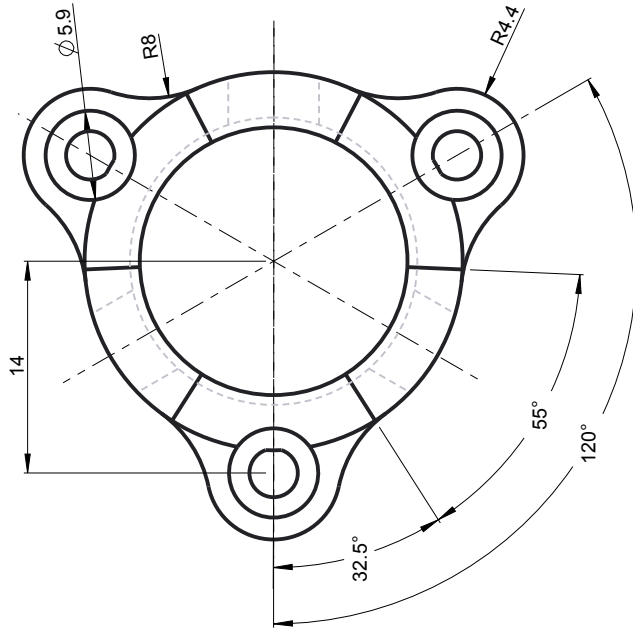
Um ein fundiertes Vorwissen zur Bewältigung der Aufgabenstellung zu erhalten, ist eine Einarbeitung in die Thematik Rapid Prototyping notwendig. Bei dieser Thematik handelt es sich um das generative Fertigungsverfahren mittels eines 3-D Filamentdruckers. In dieser Arbeit werden zwei Gelenkvarianten untersucht und dargestellt. So ist in Variante 1 ein Kardangelenkbau verbaut. Über dieses Gelenk, das am UAV montiert ist, kann das UAV gezielt gelandet werden. Die erste Gelenkvariante besteht neben dem Gelenk aus einer Welle, die über zwei Kugellager im Gehäuse fixiert ist. Für beide Gelenkvarianten wird eine Stahlplatte mit Verbindung entworfen, welche mit allen darauffolgenden Gelenkvarianten kompatibel ist. Die zweite Variante, ein Kugelgelenk, ist mithilfe eines Clips-Gelenklagers realisiert. Nach der Konzeption der Varianten werden diese hinsichtlich ihres Gewichts verglichen sowie einer kinematischen Analyse unterzogen. Aufgrund der sich daraus ergebenden Folgerungen wird die zweite Gelenkvariante für die Montage am Quadrocopter ausgewählt. Danach folgt die Implementierung des Magneten in das System des Leichtbauroboters. Durch einen Systemtest wird verifiziert, dass das Gelenk alle Spezifikationen erfüllt und auch der Elektromagnet mit der Steuerung einwandfrei funktioniert.



Im Rahmen einer Doktorarbeit wird eine der zwei Gelenkvarianten, die hier erarbeitet sind, in ein Helikopter-Landesystem integriert. Neben Verbesserungen bei den 3D-Ausdrucken, welche in den einzelnen Kapiteln erwähnt worden sind, können die Gehäuse der beiden Gelenkvarianten noch über eine Analyse mit der Finite-Elemente-Methode topologisch optimiert werden. Die Gelenkvariante 2 soll als erstes mit einem kleinen Modell-Helikopter getestet werden. Falls dieser Test erfolgreich ist, wird das Gelenk auf größere Modelle skaliert und portiert. Das schon vorhandene Gelenk wird im weiteren Verlauf der Entwicklung des Helikopter-Landesystems verwendet und ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit weiterentwickelt.

A. Anhang



 DLR		DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Weßling		Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134		General Tolerance: DIN ISO 2768-1-f		DIN A4		M 3.2	
						All Edges DIN ISO 13715		Material:			
						Surface DIN ISO 1302		ABS			
All Rights Reserved - Copyright DIN 34											
created by		Pham V. D.		01-Feb-15 02:11:49 PM							
modified by											
checked by											
No: -											
Gehäuse Variante 1											
				model:							
				file:		1/1					
		Mass ()		[1] g		Sheet					



 DLR	DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Wessling		General Tolerance: DIN ISO 2768-1-f		DIN A4	M 2:1
	Tel.: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134		All Edges DIN ISO 13715		Material:	
			Surface DIN ISO 1302		ABS	
	All Rights Reserved - Copyright DIN 34					
created by	Pham, V. D.					
modified by			02-Feb-15 02:11:49 PM			
checked by						
			No:		-	
			model:			
			Mass ('): [..] g		file: 1/1	
					Sheet	
					1/1	

Literaturverzeichnis

- [1] John J. Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison-Wesley Pub. Co., München, third edition edition, 2004.
- [2] Petra Fastermann. *3D-Druck/Rapid Prototyping*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [3] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt.
URL:http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2012_1/Das_DLR_D.pdf [12.01.2015].
- [4] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt.
URL:<http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10443/> [24.12.2014].
- [5] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt.
URL:<http://www.dlr.de/rmc/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-7660/> [23.12.2014].
- [6] igus®. igubal®-clips-gelenklager heavy duty - eclm-hd.
URL:http://www.igus.de/wpck/3359/igubal_Clips_Gelenklager_Heavy_Duty?C=DE&L=de [29.12.2014].
- [7] Johannes Kunz, Matthias Holzinger, and Mario Studer. Beiträge zu einer besseren Schnapphakenauslegung. *SwissPlastics*, pages S. 29–32, 2007.
- [8] So-Ryeok Oh, Kaustubh Pathak, Sunil K. Agrawal, Hemanshu Roy Pota, and Matt Garratt. Approaches for a tether-guided landing of an autonomous helicopter. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(3), June 2006.
- [9] Peter Pfeffer and Manfred Harrer. *Lenkungsbandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [10] RepRap. Fused filament fabrication.
URL:http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication [25.12.2014].
- [11] robbe. Navy kardan 35.
URL:http://www.robbe.de/catalog/product/view/id/367/s/navy-kardan-35/?___SID=U [25.12.14].
- [12] Malcom D. Shuster. A survey of attitude representations. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1993.
- [13] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. *Robot Dynamics and Control*. Wiley, 2. aufl. 2004 edition, 2004.

- [14] Heinz Ulbrich. *Technische Mechanik in Formeln, Aufgaben und Lösungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 3. durchges. und erg. Aufl. 2006 edition, 2006.
- [15] EADS IW und EOS. Gemeinsame Studie "Life Cycle Cooperation".
URL:http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/c7b005b8f78c376b/f516fa5c67450db0f2e25b94cca0ca3a/eos_study_de.pdf [25.12.2014].
- [16] Freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Prism Defence.
URL:www.prismdefence.com.